



**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЕЛИЧИНЫ КОРОБЛЕНИЯ
КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ**

**METHODS OF ANALYSIS AND
DETERMINATION AND WARPING
VALUES OF CRANKSHAFTS**

✉¹ **Лебедев Валерий Александрович**,
профессор, к.т.н., профессор, Донской государ-
ственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, e-mail: va.lebidev@yandex.ru

✉¹ **Lebedev Valery Aleksandrovich**,
professor, candidate of technical sciences, professor
Don state technical university, Rostov-on-Don,
e-mail: va.lebidev@yandex.ru

Эль Дакдуки Ахмад Мохамад,
аспирант, Донской государственный техни-
ческий университет, г. Ростов-на-Дону,
e-mail: el_dakdoukia81@mail.ru

El Dakduki Ahmad Mohamad,
postgraduate student, Don State Technical University,
Rostov-on-Don, e-mail: el_dakdoukia81@mail.ru

Бажанов Валерий Николаевич,
заместитель директора по производству
КРЭТ- ВНИИ Градиент, г. Ростов-на-Дону,
e-mail: lil-ovs@yandex.ru

Bazhanov Valery Nikolaevich,
deputy director for production KRET- VNII Gradient,
Rostov-on-Don, e-mail: lil-ovs@yandex.ru

Аннотация. Предложена методика расчёта величины суммарного коробления коленчатых валов после виброударной обработки, основанная на учёте остаточных напряжений сжатия, возникающих в поверхностных слоях. Представлена аналитическая модель и результаты численного моделирования коробления. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования с результатами расчетных данных, который показал их совпадение с относительной погрешностью менее 5 %.

Annotation. A method for calculating the total warping of crankshafts after vibro-impact treatment is proposed, based on the consideration of residual compression stresses that occur in the surface layers. An analytical model and the results of numerical modeling of warping are presented. A comparative analysis of the results of numerical modeling with the results of calculated data is conducted, which showed their agreement with a relative error of less than 5 %.

Ключевые слова: КОЛЕНЧАТЫЙ ВАЛ, КОРОБЛЕНИЕ, ВИБРОУДАРНАЯ ОБРАБОТКА, УПРОЧНЕНИЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Keywords: CRANKSHAFT, WARPING, VIBRATION IMPACT TREATMENT, HARDENING, NUMERICAL SIMULATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном машиностроении требования к точности геометрической формы коленчатых валов (КВ) непрерывно повышаются. В частности, биение коренных шеек КВ автомобильных и тракторных двигателей не должно превышать 0,01-0,06 мм [1]. Основной причиной погрешностей геометрической формы КВ являются коробления, вызванные остаточными

напряжениями, возникающими при упрочнении галтелей методом поверхностного пластического деформирования (ППД). Экспериментально установлено [2], что применение виброударной обработки (ВиУО) позволяет достичь равномерного упрочнения поверхностного слоя всех элементов детали, отделки и скругления острых кромок, плавности переходов, исключения поводки нежестких валов, имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей. Несмотря на то, что изучению процесса ВиУО посвящены известные исследования ученых [3–9], важным остается вопрос разработки расчетных зависимостей для проектирования технологического процесса ВиУО,

Целью данных исследований являлась разработка аналитической модели определения коробления КВ при ВиУО и проверка ее адекватности с применением методов численного моделирования.

2 Материалы и методы

Методика исследования основана на учёте остаточных напряжений сжатия, возникающих в поверхностных слоях после упрочнения. Приведён вывод расчетной формулы, рассматриваются параметры, влияющие на величину коробления, а также проведено численное моделирование и сравнительный анализ результатов с экспериментальными данными.

3 Результаты исследований

3.1 Вывод и анализ расчётной зависимости коробления КВ

Комплекс теоретических исследований, представленный в работе [1], позволил раскрыть механизм процесса коробления КВ при упрочнении галтелей методами ППД [3–6], проиллюстрированный на рис. 1.

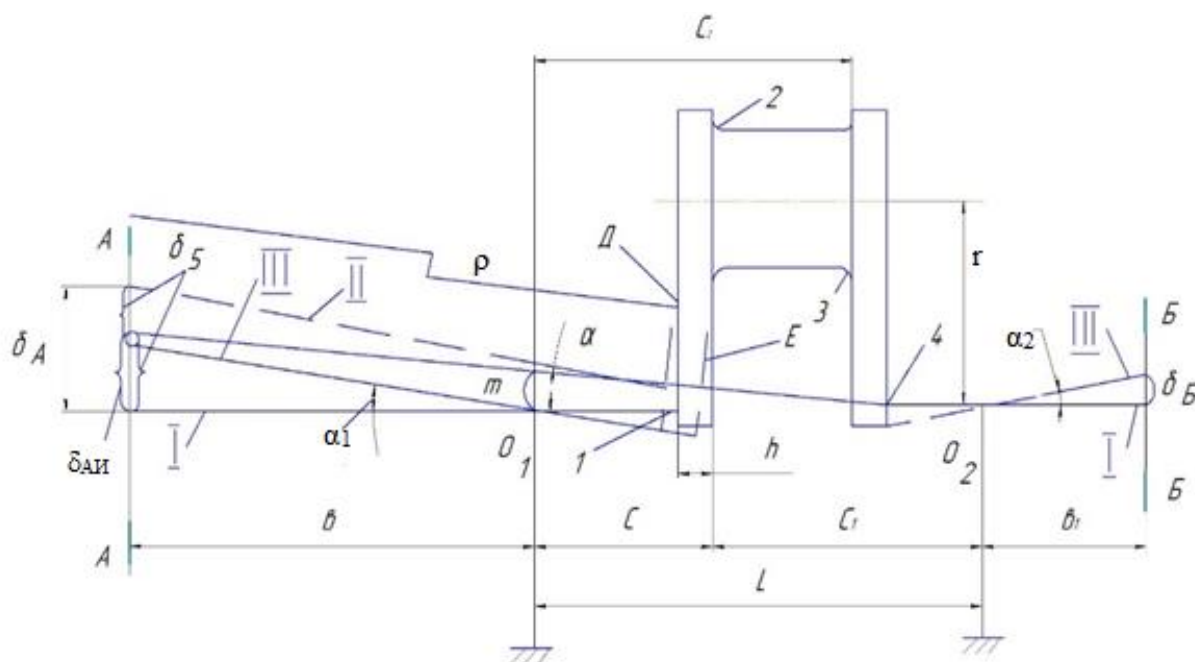


Рисунок 1 – Расчетная схема коробления КВ при упрочнении галтелей ППД

До упрочнения коренные шейки КВ (рис.1) занимают горизонтальное положение I. После ППД галтели 2 шатунной шейки щека изогнётся выпуклостью в сторону упрочнённой галтели по радиусу r и должна переместить связанную с ней левую коренную шейку в новое положение II (r – радиус сферы, по которой изгибается щека с упрочненной галтелью). Однако, так как коленчатый вал свободно лежит на опорах O_1 и O_2 , то под действием силы тяжести

он повернется вокруг точки O_2 против часовой стрелки на угол α_2 до соприкосновения левой коренной шейки с опорой O_1 . При этом в сечении опоры O_1 левая коренная шейка опустится на величину m (в сечении А-А на величину δ_5) и займёт новое положение III. При вращении КВ на опорах индикатор в сечении А-А покажет не полную (фактическую) величину коробления δ_A , а некоторую (измеряемую) её часть δ_{Ai} [7].

Для определения величины коробления КВ в сечении А-А от одновременного упрочнения галтелей 1 и 2 в работе [4] предложена следующая зависимость, вытекающая из рис. 1, мм:

$$\delta_{Ai1,2} = 6 \cdot \frac{(1 - \nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot [-\sigma_{ост1} \delta_{\sigma1}(L + h - C) + \sigma_{ост2} \delta_{\sigma2}(L - C)] \cdot \Psi, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости первого рода (МПа); r – расстояние от оси коренной шейки (КШ) до оси шатунной шейки (ШШ), мм; h – общая толщина щеки кривошипа КВ, мм; b – расстояние от КШ до конца КВ, мм; L – расстояние между КШ одного кривошипа, мм; C – расстояние от щеки (со стороны ШШ) до КШ, мм; σ_o – средняя величина остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое после ППД, МПа; δ_σ – глубина залегания остаточных напряжений сжатия, МПа; Ψ – коэффициент, учитывающий неполную обработку щеки ППД.

Из формулы (1) следует, что величина коробления зависит от материала КВ (первый множитель), жесткости щеки (второй множитель), передаточного соотношения (третий множитель), величины и глубины залегания остаточных сжимающих напряжений, формируемых в поверхностном слое КШ и ШШ в процессе упрочнения ППД (четвёртый множитель), и наконец, пятый множитель характеризует площадь поверхности щеки, обработанной ППД. Первые три множителя обусловлены конструктивными параметрами КВ и являются основополагающими при оценке величины коробления валов. Два других позволяют оценить степень влияния на коробление технологических методов ППД, выбранных для повышения эксплуатационных свойств КВ.

Рассмотрим зависимость величины коробления КВ от упрочнения их в условиях ВиУО, которая предполагает полное погружение КВ в рабочую среду, находящуюся под воздействием низкочастотных колебаний, в результате чего обработке подвергаются все поверхности, доступные для энергосилового воздействия частиц рабочей среды. Следовательно, предусмотренный в формуле (1) коэффициент Ψ , учитывающий неполную обработку щеки, можно приравнять единице.

Для определения величины остаточных напряжений в галтелях КШ и ШШ используем выражение [4], Па:

$$\sigma_o = \sigma_{max} = \frac{\sigma_{дт}}{h_y} K_{ко}, \quad (2)$$

где $\sigma_{дт}$ – динамический предел текучести, Па; h_y – глубина упрочненного слоя, м; $K_{ко}$ – глубина залегания максимальных остаточных сжимающих напряжений в зависимости от диаметральных размеров шеек КВ и деформационных параметров энергосилового воздействия части рабочей среды, определяемая по формуле:

$$K_{ко} = \left[\frac{4}{3} R - 2(R - R_a) - \frac{1}{2} (R - h_y) \left(2 \ln \frac{\rho}{(R - R_a)} - \frac{(R - h_y)^2}{3R^2} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

где R – радиус цилиндрической поверхности шеек, м; R_a – среднеарифметическое отклонение профиля поверхности шеек, м.

Глубина распространения остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое, как правило, превышает глубину упрочнённого слоя и составляет:

$$\delta_{\sigma 2} \approx K_y \cdot h_y. \quad (4)$$

где $\delta_{\sigma 2}$ – глубина распространения остаточных напряжений сжатия, м; K_y – коэффициент превышения глубины залегания остаточных напряжений, по различным источникам это превышение колеблется от $K_y=1,1-1,5$ до $K_y=1,3-2$ [8].

С учётом (3, 4) выражение (1) преобразуется к виду:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} [-K_{\text{ко1}}(L+h-C) + K_{\text{ко2}}(L-C)], \quad (5)$$

где $K_{\text{ко1}}$ – коэффициент корректировки величины максимальных остаточных сжимающих напряжений КШ; $K_{\text{ко2}}$ – коэффициент корректировки величины максимальных остаточных сжимающих напряжений ШШ.

При равенстве напряжённого состояния галтелей КШ и ШШ, то есть, когда $K_{\text{ко1}} = K_{\text{ко2}}$, величина коробления будет зависеть только от конструктивных параметров КВ и определяться по формуле:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ко}}. \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для случая, когда диаметры всех КШ и ШШ равны между собой и степень их деформационного упрочнения одинакова, при этом отсутствуют остаточные напряжения от предшествующей обработки. В реальных КВ диаметры КШ и ШШ, как правило, отличаются. Кроме того, при ВиУО их упрочнение происходит в разных по интенсивности обработки зонах рабочей камеры. Это приводит к формированию поверхностных слоёв шеек с различным напряжённым состоянием. Изменение напряжённого состояния поверхностного слоя зависит от их расстояния до стенок рабочей камеры [9]. Этот экспериментально установленный факт можно оценить соотношением:

$$K_{\text{д}} = \frac{K_{\text{ко1}}}{K_{\text{ко2}}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{д}} < 1$ – коэффициент диссипации.

С учётом (7) выражение для расчёта величины суммарного коробления КВ, упрочнённого в процессе ВиУО, будет иметь вид, мм:

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \cdot \frac{(1-\nu)}{E} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \frac{b}{L} \cdot K_y \cdot \sigma_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ко2}} [-K_{\text{д}}(L+h-C) + (L-C)], \quad (8)$$

Для снижения влияния ППД на величину коробления необходимо, чтобы обеспечивалось равенство условий:

$$R_{\text{к}} - R_{\text{ш}} \cong 3(h_{\text{уш}} - h_{\text{ук}}). \quad (9)$$

В процессе ВиУО обеспечить это условие практически невозможно.

3.2 Анализ коробления КВ с применением численного моделирования

Численное моделирование проведено с использованием метода конечных элементов в программе Solid Works. Задача решена в модуле Transient Structural. В качестве материала вала принята сталь 40Х, характеристики которой представлены на рис. 2.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Strain-Life Parameters			
20	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
21	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
22	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
23	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Рисунок 2 – Характеристики материала 40Х

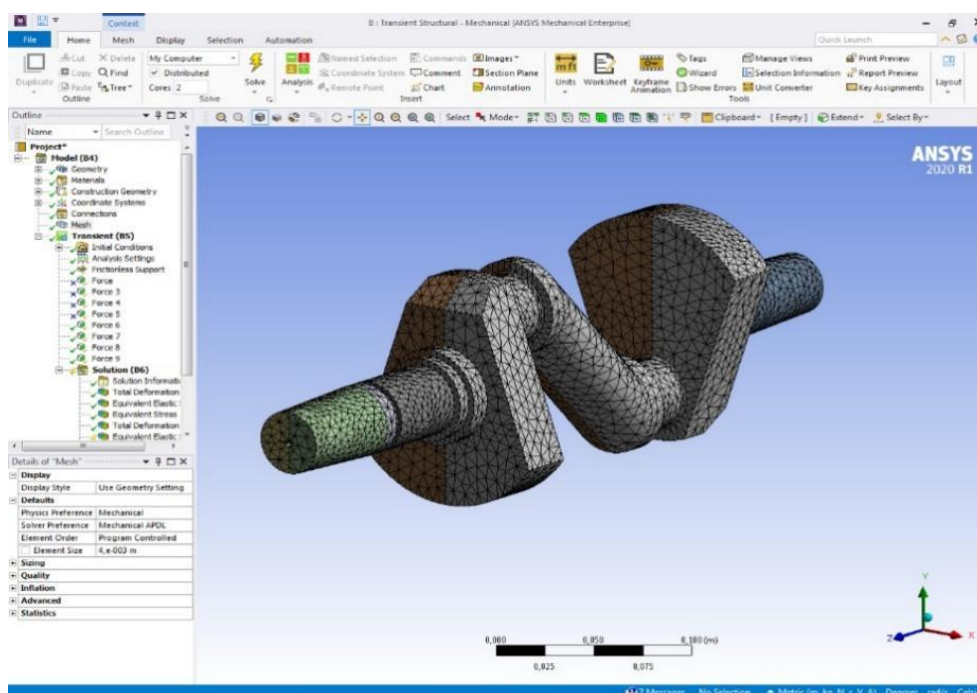


Рисунок 3 – Конечно-элементная сетка

На рис. 3 представлена конечно-элементной сетки. Вал моделировался в условиях импульсной нагрузки, имитирующей виброударное воздействие, с заданием граничных условий и распределение нагрузок симметрично на каждую из половин вала (рис. 4).

В качестве выходных данных приняты следующие параметры: общая деформация, эквивалентные упругие деформации, эквивалентные напряжения (по Мизесу). Основной характеристикой, позволяющей установить адекватность моделирования, является общая деформация (Total Deformation) в точках на поверхностях вала. Исследуются деформации в плоскостях, соответствующих рис. 3, 4. На рис. 5 представлены результаты моделирования деформации вала в процессе после ВиУО.

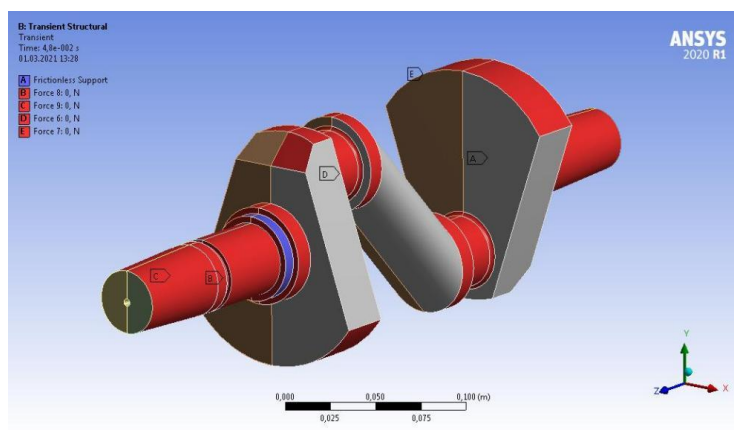


Рисунок 4 – Задание нагрузок

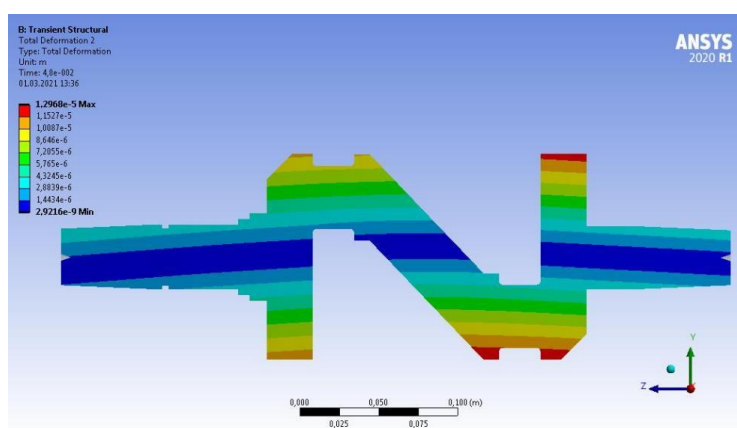


Рисунок 5 – Общие деформации вала после ВиУО, м (сечение по центральной плоскости)

3.3 Результаты сравнительного анализа

Сравнительная оценка расчётных и экспериментальных данных коробления проводилась методом численного моделирования на примере КВ, эскиз которого представлен на рис. 6. Размеры КВ: $r = 37,5$ мм, $h = 27$ мм, $L = 254$ мм, $c = 60$ мм, b в сечении А-А = 123 мм, в сечении Б-Б = 77 мм, в сечении В-В = 17 мм. В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа коробления КВ после ВиУО. Также построен график зависимости изменения деформаций в сечениях КВ от времени виброударной обработки (рис. 7).

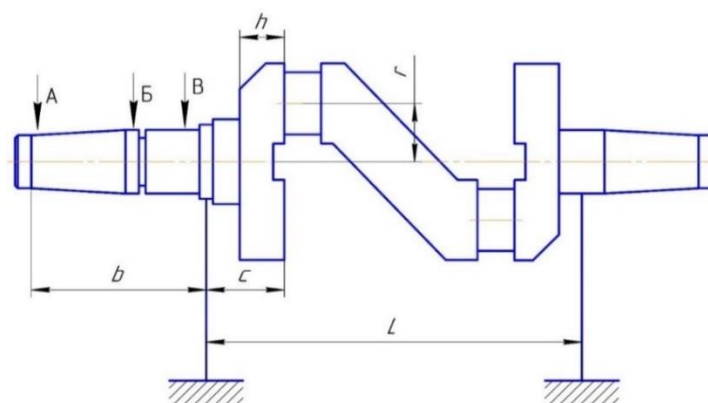


Рисунок 6 – Эскиз КВ

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных и теоретических исследований коробления КВ

Метод определения	Величина коробления в сечении, мм		
	А	Б	В
Расчетный по аналитической модели	0,02	0,01	0,005
Численное моделирование	0,016	0,009	0,0005

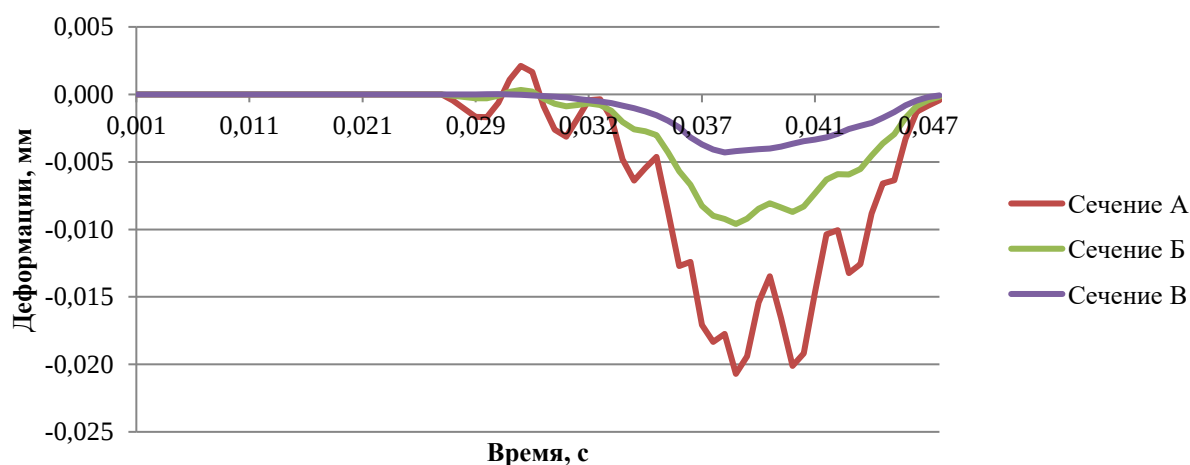


Рисунок 7 – График зависимости изменения деформаций в сечениях КВ от времени

4 Обсуждение и заключение

Проведённый сравнительный анализ результатов численного моделирования и результатов расчетных данных показал их совпадение с относительной погрешностью менее 5 %. Это подтверждает достоверность предложенной аналитической модели для определения величины коробления с высокой точностью, и тем самым обеспечивает правомерность ее использования при оптимизации режимов ВиУО.

Список литературы

- 1 Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. // Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2017. – 380 с.
- 2 Бабичев, А.П. Основы вибрационной обработки // Издательский центр ДГТУ, Ростов н/Д, 1999. – 620 с.
- 3 Емельянов, В.Н. Коробление коленчатых валов при упрочнении галтелей ППД // Известия вузов. Машиностроение, 1972. – №11. – С. 34–37.
- 4 Лебедев, В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования // Научное издание – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006/ – 183 с.
- 5 Худобин, Л. В. Направленное изменение макрогеометрии коленчатых валов / Л.В. Худобин, В.Н. Емельянов // Тр. Ульян. Политех ин-та-Т.4, вып. 2. – Ульяновск. приволж. кн.изд-во. Ульян. Отделение, 1968. – С. 40–43.
- 6 Худобин, Л.В. Обкатка галтелей коленчатых валов с учетом их коробления /Л.В. Худобин, В.Н. Емельянов // Вестник Машиностроение, 1970. – №1. – С. 47–49.
- 7 Эль Дакдуки, А. Обеспечение эффективности операций виброударного упрочнения на основе моделирования энергосиловых факторов процесса ППД / В.А. Лебедев, А. Эль Дакдуки, М.А. Белозёров // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» выпуск № 3 (66), Дон НТУ' 2019. – С. 22-30.

8 Мищенко, Р.А. Прогнозирование влияния динамических методов поверхностного пластического деформирования на повышение эксплуатационных свойств деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. – М: Машиностроение, 2006. – С.53-55.

9 Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение // ВИВД, Воронеж: 1999. – 386 с.

References

1 Zaides S.A., Emelianov V.N. Influence of surface plastic deformation on the quality of shafts: monograph, - Irkutsk: Publishing house of IRNITUS, 2017. – P.380.

2 Babichev A. P. Basics of vibration processing – Rostov on Don, Publishing Center of DSTU, 1999. – P. 620.

3 Emelyanov V.N. Warping of crankshafts in strengthening of PPD fillets. Mechanical Engineering, 1972. – No11. – P. 34–37.

4 Lebedev V.A. Technology of dynamic methods of surface plastic deformation. Scientific publication – Rostov n / D: Publishing center of DSTU, 2006. – P.183.

5 Khudobin L.V. Directional change of crankshaft geometries/L.V. Khudobin, V.N. Emelyanov // Proceedings of Ulyanovsk Polytechnic Institute, Vol. 4, issue 2. - Ulyanovsk Volga Region Book Publishing House. Ulyanovsk Branch, 1968. – P. 40-43.

6 Khudobin L.V. Running-in of crankshaft fillets taking into account their warping /L.V. Khudobin, V.N. Emelyanov // Bulletin of Mechanical Engineering, 1970.- No. 1. – P. 47-49.

7 El Dakduki, A. Ensuring the efficiency of vibration impact hardening operations based on modeling the energy and force factors of the SPD process / V.A. Lebedev, A. El Dakduki, M.A. Belozerov // International collection of scientific papers "Progressive technologies and mechanical engineering systems", issue No. 3 (66), DonNTU '2019. – P. 22-30.

8 Mishchenko R.A. Forecasting the influence of dynamic methods of surface plastic deformation on improving the performance properties of parts - Hardening technologies and coatings. - M: Mechanical Engineering, 2006. – P.53-55.

9 Kopylov Yu.R. Vibro-impact hardening. Voronezh: VIVD, 1999. – P. 386.

© Лебедев В. А., Эль Дакдуки А. М., Бажанов В. Н., 2025